

愛・地球博における大規模モバイルアドホックネットワーク実証実験の検証

伊藤 健児[†] 若山 公威[†]
岩田 彰[†] 梅田 英和^{††}

2005年6月から7月にかけて、「IT実証実験」として、愛・地球博の会場において、最大130台規模の大規模モバイルアドホックネットワークの実証実験を行った。実証実験では、アドホックネットワークにおける位置推定、およびPKIベースの機器認証と暗号化通信に基づくセキュア通信の実証を目的とし、自由に動き回っている多数の端末間でも、的確にマルチホップ通信が行えることを確認したが、規模の拡大に伴いメッセージ数の増加が問題となった。実証実験の経験から、本研究では動的なルーティングパラメータの変更による通信メッセージ数削減手法を提案し、静的パラメータを用いた従来方式より、同等の遅延時間を保ちつつ、メッセージ数を削減できることを確認した。

The Inspection of Large Scale Mobile Ad hoc Network Proof Experiment at EXPO 2005 AICHI, JAPAN

KENJI ITO,[†] KIMITAKE WAKAYAMA,[†] AKIRA IWATA[†]
and HIDEKAZU UMEDA^{††}

From June to July 2005, we have executed an experiment of large scale mobile ad hoc networks using 130 mobile wireless LAN terminals as "IT Proof Experiment" at "EXPO 2005 AICHI, JAPAN". The purpose of this experiment is to examine our position estimation method on ad hoc networks, and secure communication protocol based on authentication and encrypted communication (PKI). It has been confirmed that multi hop communications between many moving terminals were possible, but the more terminals using, the more packet collisions occurred because of message increasing. A method to change routing parameters dynamically is proposed in this paper. It has been investigated the proposed method can reduce messages than conventional method using static parameters though keeping same delay time.

1. はじめに

近年、無線LANによる、アクセスポイントを用いずに各端末が自律的にネットワークを構築する、アドホックネットワークの利用が徐々に注目されつつある。

しかし現状のアドホックネットワークは、十数台規模の比較的小規模なネットワークとして利用されることが多く、大規模に用いられた例は少ない。また、無線LANではセキュリティ確保のため、様々なセキュリティプロトコルが利用されているが、いずれもインフラモードでの利用が想定されており、現状、アドホックネットワークでのセキュリティ確保のための決定的な方法は存在しない。

本研究では、大規模なアドホックネットワークの実

現性を探る目的として、愛・地球博会場において、最大130台のノードを用いた大規模アドホックネットワークの実証実験を行った。実証実験では、アドホックネットワークでのセキュリティ確保の手段として、PKIの利用可能性を検証した。

実証実験で改めて明らかとなったメッセージ数増加の問題を解決する方法として、ネットワークの状況に応じて、動的にメッセージ送信間隔を変更することによるメッセージ数削減手法について検討した。

2. IT実証実験

モバイルアドホックネットワークの技術研究として、KDDI株式会社との共同研究「IT実証実験」を行った。

IT実証実験は、愛・地球博日本政府出展事業の一環として、KDDI株式会社が受託製作した「愛・MATE」¹⁾というモバイル端末を用い、京セラコミュニケーションシステム株式会社、慶應義塾大学、名古屋工業大学の3者でそれぞれ異なる観点からアドホックネット

[†] 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology
^{††} スカイリー・ネットワークス
Skyley Networks, Inc.

ワークの実証実験を行ったものである。IT 実証実験は、実験としてのみでなく、愛・地球博会場におけるイベントとしての側面も持つ。「愛・MATE」の機能概要を表1に示す。「愛・MATE」は Windows Mobile

表1 「愛・MATE」の機能概要

OS	Windows Mobile 2003 Second Edition for PocketPC
通信インターフェイス	CDMA 1x WIN
	IEEE802.11b
	Bluetooth

上に携帯電話の機能を備えた形の端末であり、PDAと携帯電話を組み合わせた端末であるといえる。

本稿では、名古屋工業大学における IT 実証実験について述べる。

2.1 目的および実験内容

名古屋工業大学における IT 実証実験では、次の3点を目的とした。

- アドホックネットワークでの位置推定
- アドホックネットワークにおけるセキュリティ
- 大規模アドホックネットワークの検証

本稿では大規模アドホックネットワークの検証部分についてのみ述べる。

以上の目的、および愛・地球博会場におけるイベント用コンテンツとしての要件を満たすものとして、名古屋工業大学では、IT 実証実験として「トレジャー・ハンティング」を実施した。

「トレジャー・ハンティング」とは、「愛・MATE」端末を用いた宝探しゲームである。トレジャー・ハンティングでは、「愛・MATE」端末を「親 Peer」、子 Peer」に分類して使用する。

親 Peer

親 Peer とは、会場内に固定端末として設置し、アドホックネットワークの形成補助、および、位置推定のためのランドマークとして用いる「愛・MATE」端末である。親 Peer は、「愛・MATE」の無線 LAN 機能、および、CDMA 1x WIN の機能を使用する。

子 Peer

子 Peer とは、人間が持ち歩く移動端末であり、トレジャー・ハンティングゲームアプリケーションを動作させる「愛・MATE」端末である。子 Peer では、通信インターフェイスは無線 LAN のみを使用する。

2.2 トレジャー・ハンティング

位置推定の検証、セキュリティの検証、および、大

規模アドホックネットワークの検証という3つの要件、および、愛・地球博会場内でのイベント用コンテンツとしての要件を満たすものとして、トレジャー・ハンティングというゲームを行うこととし、ゲーム用アプリケーションを作成し、実験に使用した。

ゲームの概要は次のようなものである。

- (1) 5人1組でグループを作る。
- (2) 5人がそれぞれ異なる場所に移動するよう、画面上に移動先が指示される。
- (3) 移動先に到着すると、画面に文字が現れる。
- (4) この文字は、例えば「めろんばん」のような単語のうち1文字がメンバーそれぞれに分割して表示されるものである。
- (5) メンバーはチャットでお互いの画面に表示された文字を教えあう。
- (6) メンバーのうちいずれか一人が正解である「めろんばん」を解答する。
- (7) 再び画面上に、それぞれの移動先が表示される。
- (8) 移動後に再び問題が出題され、解答すると、最後に集合場所が指定される。
- (9) 集合場所にメンバー全員が集合すると、ゲームクリアとなる。

2.3 DECENTRA

実証実験では、アドホックルーティングミドルウェアとして、株式会社スカイリー・ネットワークス社の製品である DECENTRA²⁾を使用した。

DECENTRA は Hybrid 型ルーティングプロトコルに分類され、スコープという概念を元に、スコープ内は Proactive 型ルーティング、スコープ外は Reactive 型ルーティングによってルーティングを行う。

2.4 実験方法

IT 実証実験は、図2に示した8日間に渡って行った。

6月3日は、親 Peer の設置点の座標を求めるために GPS の測定を行った。6月6日は、実験パラメータの調整のため、愛・地球博の会場において DECENTRA で隣接端末と認識される範囲を調査する実験を行った。7月7日は、DECENTRA での通信で、マルチホップが正常に行えることを確認するための補助的な実験を行った。7月8日には、位置推定精度の検証実験を行った。他の6日間は、それぞれ図2に示した端末数、規模で、トレジャー・ハンティングを実施した。

2.5 実験結果

6月6日、6月21日、6月24日、7月8日、7月11日、7月13日の6日間、トレジャー・ハンティングを実施し、それぞれの実験日において、送受信された全ての無線 LAN フレームを取得した。ただし、後

表 2 実験日時および規模

日時	実験内容	規模 (台数)
6/3	GPS 測定	5
6/6	隣接端末測定	親 Peer5、子 Peer3
	トレジャー・ハンティング	親 Peer15、子 Peer4
6/21	トレジャー・ハンティング	親 Peer16、子 Peer15
6/24	トレジャー・ハンティング	親 Peer30、子 Peer30
7/7	マルチホップ実験	8
7/8	位置推定精度検証実験	親 Peer16、子 Peer1
	トレジャー・ハンティング	親 Peer16、子 Peer15
7/11	トレジャー・ハンティング	親 Peer30、子 Peer30
7/13	トレジャー・ハンティング	親 Peer60、子 Peer65

半の3日間については、取得したフレームの保存に用いたSDカードの容量の関係から、子Peerのみをフレーム取得の対象としたため、ここでは前半3日間の結果について述べる。

各実験日のホップ数の統計を表3に示す。表3より、いずれの実験日においても適切にマルチホップ通信が行えていたことが確認できる。平均ホップ数が1未満となっているのは、送信を試みたものの、1ホップも到達しなかったものが含まれるためである。

各実験日における送信フレームと受信フレームの比を表4に、UnicastフレームとBroadcastフレームの比を表5に示す。表4で送信フレーム数に比べ受信フレーム数が多いのは、表4と表5の比率がほぼ同じであることから、ブロードキャストの影響と考えられる。

ブロードキャストの影響を調べるため、具体的なDECENTRAメッセージの内訳を調べる。DECENTRAメッセージの内訳を表6に示す。表6におけるadvertiseとは、DECENTRAが自身の存在を広告するためにブロードキャストするものであり、linkstateとは、Proactive型ルーティングにおいてルーティングテーブルを定期的に交換するものである。RREQとは、Proactive型ルーティングで経路が発見できなかった場合にReactive型ルーティングで動的経路探索を行うためのメッセージで、これに対する応答がRREPである。DTPとは、DECENTRA内のトランスポートプロトコルであり、アプリケーションで用いた通信は、主にこの中に含まれる。

表6より、実験規模が大きくなるにつれ、RREQの割合が多くなっていることがわかる。これは、規模が大きくなるにつれ、フレームの衝突が増加し、静的な経路探索の失敗が多くなるためであると考えられる。

表6では、フラッディングやマルチホップで送受信された同じ内容のメッセージを全て集計しているため、RREQに対するRREPの値が極端に小さくなっ

ているが、これはRREQがフラッディングされるのに対して、RREPがユニキャストで送信されるため、RREQとRREPが1対1に対応していないためである。重複したメッセージを考慮した場合のRREQに対するRREPの割合を表7に示す。RREQとRREPは、本来1対1に対応するため、RREP/RREQの値は100%となるべきだが、いずれの実験日においても、RREQに対するRREPの割合は非常に小さな値となっている。これは電波の衝突により、多くのフレームがロストしていることを示していると考えられる。

表 3 ホップ数統計

日時	時間 (分)	平均ホップ数	RREP/RREQ 最大ホップ数
06/06	35	0.75	6
06/21	60	0.67	7
06/24	90	0.88	7

表 4 送信フレームと受信フレームの比

日時	送信フレーム数 (比率)	受信フレーム数 (比率)	合計
06/06	14,174(23.0%)	47,523(77.0%)	61,697
06/21	38,408(35.6%)	69,381(67.9%)	107,789
06/24	326,612(22.0%)	1,332,058(78.0%)	1,708,670

表 5 Unicast フレームと Broadcast フレームの比

日時	送信フレーム数 (比率)	受信フレーム数 (比率)	合計
06/06	17,525(28.4%)	44,172(71.6%)	61,697
06/21	32,102(34.4%)	70,687(65.6%)	107,789
06/24	345,468(20.2%)	1,363,202(79.8%)	1,708,670

表 6 DECENTRA メッセージ内訳

メッセージ	6/6	6/21	6/24
advertise	22015(36.3%)	30338(29.4%)	324884(19.4%)
linkstate	19822(32.7%)	24683(23.9%)	266760(15.9%)
RREQ	2344(3.9%)	15377(14.9%)	764049(45.7%)
RREP	36(0.0%)	880(0.8%)	8695(0.5%)
DTP	16398(27.1%)	32082(31.0%)	309300(18.5%)

2.6 考 察

実験結果より、規模が大きくなるにつれ、静的な経路探索の失敗が多発することがわかった。メッセージが頻繁にロストしている様子からも、規模が大きくな

表 7 RREQ に対する RREP の割合

日時	時間 (分)	RREQ	RREP	RREP/RREQ (%)
06/06	35	274	2	0.7
06/21	60	2717	409	15.1
06/24	90	15441	2078	13.5

るにつれ、ブロードキャストの比率が増加することによって、フレームの衝突、およびそれに起因する輻輳がネットワーク全体のパフォーマンスに著しい影響を与えていたものと考えられる。

3. メッセージ数削減手法の提案

大規模なアドホックネットワークでは、通信に電波を用いる無線 LAN の特性から、電波の頻繁な衝突、およびそれに伴う輻輳が大きな問題となる。IT 実証実験の結果からも、ネットワークに参加する端末が増加するに従い、送信メッセージ数の極端な増加が起こることがわかった。メッセージ数の増加により、メッセージの衝突確率が増加し、輻輳によって、ネットワーク全体のパフォーマンスが悪化する。本研究では、IT 実証実験から明らかとなった問題点、および、IT 実証実験で得られた経験を元に、アドホックネットワークにおけるメッセージ数削減手法を提案する。

3.1 関連研究

アドホックネットワークにおけるメッセージ削減手法としては、OLSR³⁾における、Multi Point Relay(MPR)がある。OLSRでは、2ホップ先のノードを重複しないように選択したMPR集合と呼ばれるノード集合を定義し、これを用いたフラッディングの効率化を図る。提案方式はメッセージの送信頻度に着目したもので、MPRとは異なる観点からのメッセージ削減手法であり、MPRとは独立して適用可能なものと考えられる。

高密度なアドホックネットワークにおけるメッセージ削減手法として、AODVの改良提案⁴⁾がある。これもMPR同様、ネットワークのトポロジに着目し、フラッディングにおける再送を制限するもので、提案方式とは独立に適用可能なものであると考えられる。

3.2 提案方式の概要

今回のIT実証実験においては、アドホックルーティングミドルウェアとしてスカイリー・ネットワークスのDECENTRAを使用した。DECENTRAでは、ネットワーク上の全ての端末が分散協調的に動作する必要性から、原則として全ての端末で同じパラメータを設定する必要がある。また、一度設定したパラメータは、ネットワーク全体をリセットするまで変更されることはない。また、これはDECENTRAに限らず、他の多くのルーティングプロトコルでも同様である。

DECENTRAでアプリケーションから設定可能なパラメータとして、advertise_rate、およびneighbor_expirationがある。advertise_rateは、周囲に自らの存在を広告するためのhelloパケットを送信する時間間隔を設定するものである。neighbor_expirationは、隣接端末から一定時間advertiseを受け取らない場合に、その端末を隣接でないと判断するまでの時間間隔である。従って、neighbor_expirationは、必ずadvertise_rateより大きな値を設定する必要がある、neighbor_expirationを小さくするためには、必然的にadvertise_rateも小さくする必要があるといったように、これらのパラメータ間には密接な関係がある。

advertise_rateとneighbor_expirationの値は、ネットワークでどの程度の発見、および消滅遅延時間を許容するかを考慮して決定する。発見遅延時間とは、2つのノード同士が互いの電波到達範囲に入ったとき、それをノードが実際に検知するまでの時間差である。消滅遅延時間とは、あるノードがあるノードの電波到達範囲から離脱したことをノードが実際に検知するまでの時間差である。

発見遅延時間を小さくするためには、advertise_rateを小さくする必要がある。消滅遅延時間を小さくするためには、neighbor_expirationを小さくする必要がある。一方、advertise_rateを小さくすると、メッセージ送信間隔が小さくなるために、送信されるメッセージ数が大きくなる。従って、遅延時間とメッセージ数はトレードオフの関係にある。

DECENTRAの方式では、advertise_rate、およびneighbor_expirationをネットワーク全体で常に同じ値とする必要があるが、提案方式では、ネットワークの状況に応じて、これらのパラメータを動的に変更することを考える。

動きの激しい、より動的なネットワークにおいては、ノードの発見、消滅がより頻繁に起こるため、発見、消滅遅延時間を小さくするためにadvertiseメッセージ数を大きくする必要があるが、動きの少ない、相対的に静的なネットワークにおいては、相対的に動的であるネットワークと同等の遅延時間とするために動的なネットワークと同等のadvertiseメッセージ数は必要とされないとと思われる。提案方式は、ネットワークで相対的に静的な部分においてメッセージ数を削減することで、ネットワーク全体のメッセージ数を削減し

つつ、ネットワーク全体として、発見、消滅遅延時間が大きく増加しないことを期待する。

3.3 提案方式におけるパラメータ決定方法

提案方式においてルーティングパラメータを動的に決定する方法を説明する。

提案方式で新たに導入される用語、パラメータについて説明する。

node_increase_rate(1/s)

状況に応じて決定される、単位時間当たりの新規ノード増加率。

advertise_rate(s)

node_increase_rate に従って動的に変化する hello パケット送信間隔。

neighbor_expiration(s)

あるノードから見て、他の特定のノードを無効とするまでの時間。他のノードの advertise_rate に従って変化する。

max_advertise_rate(s)

最大 advertise_rate を決定するパラメータ。

min_advertise_rate(s)

最小 advertise_rate を決定するパラメータ。

max_advertise_rate_increase(s)

単位時間当たりに advertise_rate が増加する上限の保証値を決定するパラメータ。

3.4 advertise_rate の決定

advertise_rate は、単位時間あたりの隣接端末増加率 node_increase_rate を引数とする次の式によって決定される。

$$\begin{aligned}
 x &= \text{node_increase_rate} \\
 \min &= \text{min_advertise_rate} \\
 \max &= \text{max_advertise_rate} \\
 \text{advertise_rate}(x) &= \frac{\min * \max}{x/\alpha * (\max - \min) + \min} \quad (1)
 \end{aligned}$$

ただし、 α は $\text{advertise_rate}(\alpha) = \min$ となる値である。

1 式は、node_increase_rate の逆数を、 $\text{advertise_rate}(0) = \max$ 、 $\text{advertise_rate}(\alpha) = \min$ となるように正規化したものである。

隣接端末の増加率が大きいということは、その端末の周囲のネットワークの変化が大きく、相対的に動的であることを意味する。反対に、隣接端末の増加率が小さい場合には、その端末の周囲のネットワークの変化は小さく、相対的に静的であることを意味する。1 式は、隣接端末の増加率、node_increase_rate が最大のおきに advertise_rate が最小となり、node_increase_rate

が最小のとき、advertise_rate を最大とすることを意味する。つまり、より動的なネットワークでは、頻繁な advertise を行い、より静的なネットワークでは、advertise 間隔が大きくなり、送信メッセージ数を減少させる。

1 式内の α の値は、advertise_rate を最小とするときの、node_increase_rate の最大値を表す。node_increase_rate の最大値は、node_increase_rate の分布を調査し、最大値として適当な値を選択する。

min_advertise_rate=2、max_advertise_rate=30、 $\alpha=4$ とした場合の node_increase_rate と advertise_rate の関係を図 1 示す。図 1 は 1 秒あたりに増加

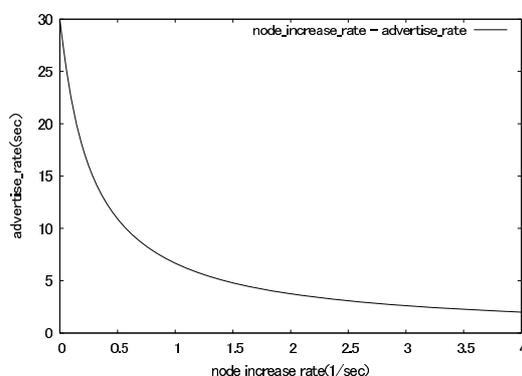


図 1 node_increase_rate - advertise_rate

する隣接端末数が最小値 0 の場合に advertise_rate が max_advertise_rate である 30 秒となり、最大値 $\alpha=4$ の場合に min_advertise_rate である 2 秒となることを示している。

advertise_rate は、1 式で決定されるが、前回の advertise_rate から、今回の advertise_rate までに増加する最大値 max_advertise_rate_increase を越えないように調整する。

3.5 neighbor_expiration の決定

neighbor_expiration は、自分から見た、他のノードそれぞれに対し、それぞれの advertise_rate から決定される値である。

A における、B の最後の advertise_rate を $\text{last_advertise_rate}(A, B)$ と定義する。

last_advertise_rate により、A における B に対する neighbor_expiration は次のように定義される。

$$\begin{aligned}
 \text{neighbor_expiration}(A, B) &= (\text{last_advertise_rate}(A, B) \\
 &+ \text{max_advertise_rate_increase}) \times \beta \quad (2)
 \end{aligned}$$

ただし、 β はメッセージの衝突による advertise メッ

セージのロストを考慮し、advertise メッセージを何回受けとらなかつた場合に隣接端末を無効とするかを定めるパラメータである。max_advertise_rate_increase は、advertise_rate の変動における 1 回あたりの最大増加値であり、advertise_rate が動的に変動するために必要となる。

3.6 評価

提案方式の有効性を検証するため、シミュレータを作成し、従来方式、提案方式について、それぞれ次のように条件を設定してシミュレーションを行った。

共通

- 電波到達距離: 100m
- フィールド: 500m × 500m
- ノード数: 100
- 静止ノード数: 80
- 移動ノード数: 20
- 移動ノードの移動パターン: フィールド上でランダムな点を選択し、1m/s で目的地に直進、到着後、2min 停止、再びランダムな点へ移動を繰り返す
- シミュレーション時間: 30min
- β (隣接端末を無効とする advertise 回数): 3

従来方式

- advertise_rate: 11sec~120sec
- neighbor_expiration: advertise_rate $\times\beta$

提案方式

- min_advertise_rate: 2sec~90sec
- max_advertise_rate: min_advertise_rate+60sec
- max_advertise_rate_increase: 4sec

シミュレーションでは、従来方式、および提案方式のメッセージ数と遅延時間の関係を調べる。従来方式においては、advertise_rate を 11 秒から 120 秒の範囲で静的に設定してそれぞれシミュレーションを行い、それぞれのメッセージ数、および遅延時間を得る。提案方式においては、advertise_rate を 2 秒~62 秒の範囲から、90 秒~150 秒の範囲にそれぞれ変動する範囲を定めてシミュレーションを行い、それぞれのメッセージ数、および遅延時間を得る。以上の条件で行ったシミュレーションの結果を図 2 に示す。

図 2 より、メッセージ数と消滅遅延時間の関係については、提案方式は従来方式とほぼ同等か、やや劣った結果となっているが、メッセージ数と発見遅延時間の関係については、提案方式は、従来方式と同等の遅延時間で、よりメッセージ数が少なく、メッセージ数が削減できていることが確認できる。

以上より、提案方式では、従来方式と同等のメッセー

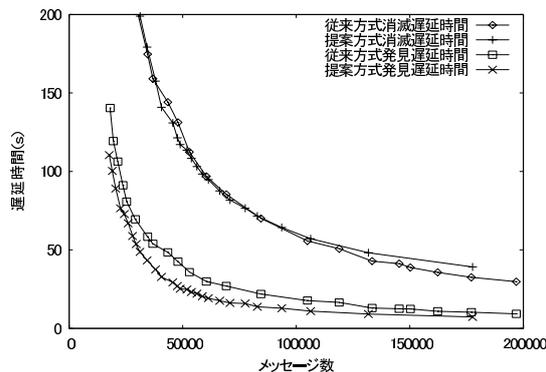


図 2 シミュレーション結果

ジ数でも消滅遅延時間は大きく悪化せず、従来方式と同等の発見遅延時間を保ちつつ、メッセージ数が削減できていることが確認できた。

4. まとめ

大規模なモバイルアドホックネットワークの実現性を実証することを目的とし、「IT 実証実験」として、愛・地球博において最大 130 台のノードを用いたアドホックネットワークの実証実験を行った。

実証実験では、大規模なアドホックネットワークでも的確にマルチホップ通信が行えたことから、その実現性を確認できたが、ネットワークに参加するノードが増加するに従い、メッセージの衝突が増加し、それに起因する輻輳によって、ネットワーク全体のパフォーマンスが悪化することが問題となった。

本研究では、メッセージ数増加の問題点を解決するため、DECENTRA のルーティングパラメータの動的な変更によるメッセージ数削減手法を提案した。

シミュレーションにより、提案方式を用いて、従来方式と同等の遅延時間を保ちつつ、メッセージ数を削減できることを示した。

参考文献

- 1) “愛・地球博「愛・MATE」IT 実証実験”
<http://it.ai-mate.jp/> (2006 年 3 月末まで)
- 2) “SKYLEY NETWORKS” <http://www.skyley.com/>
- 3) T. Clausen, P. Jacquet “Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)” RFC 3626 October 2003
- 4) 沖野正宗, 加藤聰彦, 牛島準一, 伊藤秀一, 飯作俊一 “高密度アドホックネットワークのための ADOV ルーティングプロトコルの提案” 情報処理学会論文誌 Vol.45, No.12, pp.2557-2565 Dec 2004